

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
PAULO HENRIQUE MESSIAS PINTO

N. CLASS.	M678.24
CUTTER	P659v
ANO/EDIÇÃO	2012

VULCANIZAÇÃO DE BORRACHA EPDM: vulcanização de um perfil de borracha EPDM (etileno propileno dieno) com compostos de diferentes densidades em túnel de ar quente

Varginha
2012

FEPESMIG

PAULO HENRIQUE MESSIAS PINTO

**VULCANIZAÇÃO DE BORRACHA EPDM: vulcanização de um perfil de borracha
EPDM (etileno propileno dieno) com compostos de diferentes densidades em túnel de ar
quente**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica
do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-
requisito para obtenção do grau de Bacharel, sob
orientação do Prof. Me. Luiz Carlos Vieira Guedes.

**Varginha
2012**

FEPESMIG

PAULO HENRIQUE MESSIAS PINTO

VULCANIZAÇÃO DE BORRACHA EPDM: vulcanização de um perfil de borracha EPDM (etileno propileno dieno) com compostos de diferentes densidades em túnel de ar quente

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: ____ / ____ / ____

Prof. Me. Luiz Carlos Vieira Guedes

Prof. Me. Alexandre de Oliveira Lopes

Prof. João Mário Mendes de Freitas

Dedico este trabalho a todos que de certa
maneira contribuíram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a minha família e a todos os meus colegas que me deram força para vencer mais uma etapa.

“Os obstáculos são aquelas coisas terríveis que
você vê quando desvia os olhos do seu
objetivo.”

Henry Ford

RESUMO

O presente trabalho trata de uma situação bem comum em uma fábrica de borracha, que tem como principais clientes grandes montadoras do mundo todo. Devido as mais variadas tecnologias empregadas na construção de diversos modelos de automóveis, a busca pela perfeição é incansável, por isso os clientes estão cada vez mais exigentes, e para atender essas exigências precisam ser utilizados materiais de diferentes composições como o EPDM (etileno-propileno-dieno) que é classificado como material polimérico. Porém na utilização de EPDM com diferentes densidades o processo de vulcanização se torna mais complexo, pois um material com densidade mais alta necessita de uma temperatura maior para atingir o grau de vulcanização ideal, já um material com a densidade menor necessita de menos temperatura, e se o material receber uma temperatura maior do que a necessária pode ocorrer o processo chamado de reversão, portanto o uso de materiais com densidades diferentes no mesmo produto requer uma temperatura que atenda aos dois casos, para que o produto final seja aprovado nos testes especificados.

Palavras-chave: EPDM (etileno-propileno-dieno). Vulcanização. Densidade.

ABSTRACT

This paper deals with a situation quite common in a rubber factory, whose main clients major automakers worldwide. Because of the various technologies used in the construction of various car models is the relentless pursuit of perfection, so customers are increasingly demanding, and to meet these requirements must be utilized materials of different compositions such as EPDM (ethylene propylene diene) that is classified as polymeric material. However the use of EPDM with different densities the vulcanization process becomes more complex since a material, with higher density requires a higher temperature to achieve the optimum degree of vulcanized since a material, with lower density requires less temperature, and receive the material at a temperature higher than necessary may occur process called reversal, so the use of materials with different densities in the same product requires a temperature that meets the two cases, so that the final product is passed the tests specified.

Keywords: *EPDM (ethylene propylene diene). Vulcanization. Density.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Início da comercialização de alguns polímeros sintéticos	12
Figura 2: Túnel de aquecimento	18
Figura 3: Vista frontal do perfil.....	19
Figura 4: Forno de ar quente	20
Figura 5: Painel indicador de temperaturas	20
Figura 6: Pontos onde foram medidas as temperaturas	21
Figura 7: Termômetro infravermelho	24
Figura 8: Resultado do teste de vulcanização.....	24
Figura 9: Resultado dos testes para propriedades mecânicas.....	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 VULCANIZAÇÃO DE BORRACHA EPDM	10
2.1 Aspectos históricos dos polímeros	10
2.2 Efeitos da vulcanização	13
2.3 Modos de transferência de calor	14
2.4 Escoamento de ar no túnel	16
3 MÉTODOS	18
3.1 Densidade dos compostos	18
3.2 Temperatura das zonas de aquecimento	19
3.3 Velocidade de linha	21
3.4 Temperaturas na superfície do perfil	21
3.5 Teste do grau de vulcanização	22
3.6 Teste das propriedades mecânicas	22
4 RESULTADOS	23
4.1 Dimensões do túnel de ar quente	23
4.2 Tempo de residência do perfil no forno	23
4.3 Teste de vulcanização	24
4.4 Propriedades mecânicas	25
5 CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho retrata o uso de compostos de EPDM que é considerada uma borracha sintética, com diferentes valores de densidade, tornando a vulcanização em túnel de ar quente mais complexa, geralmente esses túneis são utilizados em indústrias de borracha para o setor automotivo, no caso deste trabalho foi estudado um perfil de borracha que é utilizado como vedação para portas de automóveis. Por ser empregado nas partes externas do automóvel é necessária uma resistência maior a ação do tempo como chuva e sol, o que torna o grau de vulcanização do perfil muito importante. Um dos problemas de um perfil como esse é sua composição, pois devido a especificações do grau de vulcanização e propriedades mecânicas, é necessário o uso de compostos de EPDM com diferentes valores de densidade em um só perfil, o que torna os parâmetros de temperatura do forno, onde se encontra o túnel de ar quente, importantes para as características do produto final que é o perfil.

O objetivo do trabalho é atingir a otimização no uso dos parâmetros de temperatura para um perfil composto de 3 materiais com diferentes densidades sendo também diferentes áreas. Foram coletados os parâmetros de temperatura, velocidade de linha e medida a temperatura na superfície do perfil em diferentes pontos no dia 19/09/2012, e no final da linha de produção foram retiradas 4 amostras de 100 mm, sendo 1 enviada para o teste de vulcanização e 3 para os testes de propriedades mecânicas.

2 VULCANIZAÇÃO DE BORRACHA EPDM

Devido a utilização de vários compostos de EPDM para atingir as condições de um produto adequado as solicitações dos clientes, com isso aumenta a dificuldade de se atingir um grau de vulcanização desejável, devido as diferenças de cada composição de EPDM.

2.1 Aspectos Históricos dos Polímeros

De acordo com Hage (1998) a evolução da humanidade, desde o início dos tempos está relacionada a capacidade dos seres humanos em desenvolver alternativas que garantam a sobrevivência e qualidade de vida. Desta forma é possível observar os avanços da tecnologia em diversas áreas como na saúde, na alimentação, na comunicação, no transporte entre outras. De acordo com Hage (1998 p. 6) “Grande parte das mudanças ocorridas até os dias atuais se deve á disponibilidade de materiais adequados para transformar as idéias, e mesmo sonhos, em realidade.”

Neste século grande parte das mudanças feitas pelo homem está relacionada ao surgimento dos polímeros como um material alternativo. Como exemplo desses materiais estão, as borrachas sintéticas, plásticos, e fibras sintéticas que de certa forma revolucionaram o desenvolvimento dos setores automotivos, eletro - eletrônicos, têxteis, das mais variadas embalagens, da área de medicina, entre outros. De acordo com Hage (1998 p. 6) “A importância dos polímeros como materiais disponíveis para transformação tecnológica deste século é tal que não seria exagero considerar a hipótese que algum historiador no futuro venha a designar este período, cronologicamente, como a Idade dos Polímeros.”

Apesar dos polímeros revolucionarem o desenvolvimento tecnológico deste século, o surgimento dos mesmos, levando em consideração o ponto de vista científico, aconteceu por volta de 1832 onde um famoso químico alemão J. Berzelius tentou criar um nome ou um termo para tratar de forma diferente moléculas orgânicas, que tinham os elementos químicos semelhantes, mas não as mesmas propriedades químicas, podendo citar como o exemplo os gases etileno e buteno. De acordo com Hage (1998 p. 6) “J. Berzelius esclareceu que as moléculas de buteno, possuindo 4 átomos de carbono e 8 átomos de hidrogênio, seriam o estado polimérico das moléculas de etileno, que em sua opinião possuíam 1 átomo de carbono e 2 átomos de hidrogênio.” Contudo o termo polímero foi usado para representar as moléculas de buteno sendo muitas (poli) unidades (meros).

As primeiras experiências que foram feitas pelos cientistas com algumas substâncias poliméricas envolviam polímeros naturais como a borracha natural, amido, celulose e proteínas. Além do fato de a borracha natural ser menos dominante que a celulose e as proteínas, ela foi de grande importância para o cenário histórico e para a ciência dos polímeros. Pela grande diferença em suas propriedades elásticas em relação aos corpos sólidos que até então eram conhecidos, grande parte das pesquisas sobre a mesma foram realizados por certa curiosidade. Em 1826 M. Faraday realizou uma análise química na borracha natural e constatou uma razão em peso de 6,8 entre átomos de carbono e hidrogênio. Porém hoje se conhece que essa relação é de 7,5. E na data de 1857 Lord Kelvin publicou um trabalho teórico onde analisou o comportamento de alguns corpos sólidos quando submetidos a determinados efeitos térmicos. Próximo a esta época Charles Goodyear conseguiu chegar em um processo de vulcanização da borracha natural, o que tornou possível o seu uso em algumas aplicações onde a elasticidade fosse imprescindível. De acordo com Hage (1998 p. 7) “O início da indústria de polímeros ocorreu basicamente com o domínio da tecnologia de vulcanização da borracha natural.” De acordo com Hage (1998), antes desse processo a borracha natural já era muito utilizada em várias aplicações, porém as características pegajosas limitavam seu uso. Com a criação da técnica de vulcanização o consumo de borracha natural passou de 25 toneladas para 6000 toneladas em 1860.

Ainda de acordo com Hage (1998), as décadas de 20 e 30 foram muito importantes para estabelecer alguns conceitos básicos que dizem respeito a ciência dos polímeros, onde alguns nomes devem ser lembrados devido sua importante participação como, Staudinger, Carothers, Flory entre vários outros. Já as décadas de 40, 50 e 60 tiveram importância para o desenvolvimento da síntese de novos polímeros. O avanço tecnológico juntamente com o científico teve seu reconhecimento no cenário mundial devido a concessão de vários prêmios Nobel. Os polímeros podem ser considerados bem recentes se forem comparados com materiais tradicionais como os metais e cerâmicas, que são utilizados pela humanidade a muitos séculos.

Figura 1- Início da comercialização de alguns polímeros sintéticos.

Ano	Sigla	Polímero	Fabricante
1927	PVC	Poli(cloreto de vinila)	B. P. Goodrich
1930	PS	Poliestireno	I.G.Farben/Dow
1936	PMMA	Poli(metacrilato de metila)	Rohm and Haas
1936	PA 6,6	Nylon 6,6	DuPont
1939	LDPE	Poli(etileno de Baixa Densidade)	ICI
1946	PTFE	Poli(tetra fluor etileno)/TEFLON	DuPont
1948	ABS	Copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno	Rohm and Haas/ I.G.Farben
1954	PU	Poliuretanos	Bayer/DuPont
1954	HDPE	Poli(etileno de Alta Densidade)	Hoechst
1954	PET	Poli(tereftalato de etileno)	ICI
1956	PA 6	Poliamida ou Nylon 6	Allied
1957	PP	Polipropileno	Phillips Petrol.
1958	PC	Policarbonato	GE/Bayer
1958	POM	Poli(acetal ou Acetal)	DuPont
1959	LLDPE	Poli(etileno Linear de Baixa Dens.)	DuPont-Canada
1960	ARAMID	Poli(amida aromática)	DuPont
1963	PI	Poliimidas	DuPont
1965	PPO	Poli(eter fenileno) ou Noryl	GE
1965	SBS	Borracha Termoplástica	Shell
1969	PBT	Poli(tereftalato de butileno)	Celanese
1972	PPS	Poli(sulfeto de fenileno)	Phillips Petrol.
1972	LCP	Cristal Líquido Polimérico	Carborundum
1978	PES	Poli(éter sulfona)	ICI
1978	PEEK	Poli(éter éter sulfona)	ICI
1982	PEI	Poli(éter imida)	GE
1987	PA 4,6	Poliamida ou Nylon 4,6	DSM

Fonte: Artigo científico elaborado pelo Prof. Dr. Elias Hage Jr., Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, SP

De acordo com Pinheiro (2001), os polímeros podem ser divididos em 3 classes:

- **Termoplásticos**, que são compostos com moléculas mais longas separadas quimicamente, e são caracterizadas por ligações secundárias, tendo como exemplo o poliestireno e o policarbonato.
- **Termo-fixos**, são compostos por moléculas longas que são em uma forma tridimensional por meio de ligações primárias, um dos exemplos de termo-fixo é a resina fenólica.
- **Elastômeros**, no estado inicial são pegajosos e mostram fluência na temperatura ambiente. Para transformá-lo em um material útil suas moléculas devem ser submetidas ao processo de ligações cruzadas. Um grande exemplo de elastômero é a borracha.

2.2 Efeitos da vulcanização

De acordo com Oliveira; Soares (2002), grande parte das indústrias que tem como matéria prima a borracha, utilizam um processo de vulcanização a base de enxofre. Porém existem vários aceleradores disponíveis no mercado, com o uso dos aceleradores pode-se variar a velocidade de cura, tempo de pré-cura e propriedades finais. Devem ser lembrados como exemplo os aceleradores mais importantes que são: sulfenamidas, mercaptobenzenotiazóis, tiurans e aminas. Os aceleradores podem ser combinados na mistura nas devidas proporções e melhorar ainda mais as características do produto final.

De acordo com Oliveira; Soares (2002), embora há alguns anos a mistura NBR/EPDM seja objeto de estudo de vários pesquisadores, o número de informações ainda é pequeno sobre o método mais adequado para um sistema de vulcanização a base de enxofre. Um aumento da quantidade de enxofre nas misturas diminui o tempo de cura da borracha.

Ainda de acordo com Oliveira; Soares (2002), a dureza depende da quantidade de ligações cruzadas que são formadas durante o processo de vulcanização, portanto pode ser diretamente afetada pela quantidade de enxofre presente na mistura. De acordo com Oliveira; Soares (2002 p.15) “Quanto maior for a quantidade de enxofre maior será a dureza e maior será o grau de reticulação.” A deformação na ruptura tem relação com a quantidade de enxofre na mistura, onde com o aumento do enxofre a deformação na ruptura diminui, isso pode ocorrer provavelmente a uma maior densidade das ligações cruzadas. A resistência ao rasgamento não é influenciada diretamente pela quantidade de enxofre. Todos os sistemas de vulcanização influenciam no aumento da resistência a compressão quando se utiliza uma maior quantidade de enxofre, de acordo com Oliveira; Soares (2002 p.16) “esta tendência pode ser explicada pelo aumento da densidade de ligações cruzadas tornando maior a rigidez do vulcanizado.”

De acordo com Canaud; Visconte; Nunes (2001), as propriedades mecânicas dos materiais poliméricos são muito importantes quando são consideradas algumas de suas aplicações. Isto deve ser levado em consideração devido o fato de que, para qualquer que seja a condição de trabalho real, as propriedades como resistência á tração, módulo, alongamento na ruptura e resistência ao impacto se fazem necessárias no momento da escolha de um material polimérico.

De acordo com Pinheiros (2001), a vulcanização é uma reação termoquímica, onde as cadeias da borracha crua são ligadas pela do enxofre, ou seja, pontes de enxofre, formando dessa maneira uma rede tridimensional com características de alta elasticidade e resistência.

Devido a função do binômio tempo-temperatura e composição ou formulação da borracha, as pontes de enxofre podem ser classificadas em, monossulfídricas, dissulfídricas ou polissulfídricas. Cada um desses tipos atenuam as mesmas propriedades e características da vulcanização (resistência, dureza, módulo, etc.). Assim como o tipo de ligação de enxofre é função da temperatura, tempo e formulação do composto utilizado, é fato comprovado que a própria cinética de vulcanização é função dessas variáveis. Denomina-se cinética de vulcanização ou cinética de cura a velocidade ou a taxa com que ocorre a conversão do enxofre livre em enxofre combinado com as cadeias de carbono. Pois no início da reação a quantidade de enxofre combinado é zero, mas a medida que o tempo passa e é cedida a temperatura começa a combinar gradativamente até atingir 100%.

2.3 Modos de transferência de calor

De acordo com Kreith (1977), quando houver um gradiente de temperatura na parte interior de um sistema, ou até mesmo dois sistemas que se encontrem em diferentes temperaturas sejam colocados em contato, ocorrerá uma transferência de energia. O processo ocasionado pela transmissão de energia tem o nome de transmissão de calor, onde a entidade em trânsito, que se chama calor, não pode ser mensurada ou observada diretamente. Porém os efeitos que são produzidos podem ser susceptíveis à observação e a medida. De acordo com Kreith (1977 p.1) “O fluxo de calor, como o desempenho de trabalho, é um processo pelo qual a energia interna de um sistema se modifica.”

Ainda de acordo com Kreith (1977), o que diz respeito a engenharia, a determinação da quantidade de calor que é transmitida em uma unidade de tempo para uma diferença de temperatura especificada é considerado um problema-chave. Para dimensionar o custo, o tamanho necessário para que o equipamento transmita uma quantidade especificada de calor em um certo intervalo de tempo, por isso deve ser feita uma análise criteriosa do processo.

De acordo com Incropera; Dewitt; Bergman; Lavigne (2008), existem 3 meios de transferência de calor que são; a condução, a convecção e a radiação.

De acordo com Incropera; Dewitt; Bergman; Lavigne (2008), a condução pode ser compreendida como a transmissão de energia de partículas com maior quantidade de energia, para aquelas com menor quantidade de energia, devido às interações entre diferentes moléculas. O mecanismo físico da condução pode ser mais fácil explicado, por meio da consideração de um gás e do uso de algumas idéias vindas da termodinâmica. Temperaturas mais altas estão relacionadas às energias moleculares mais altas ou quando as moléculas

vizinhas se chocam, como acontece constantemente, uma transferência de energia de moléculas com maior quantidade de energia para as moléculas com menor quantidade de energia, ocorre na presença de um gradiente de temperatura, portanto transferência de energia por condução deve, por sua vez, acontecer na direção da diminuição de temperatura. Isso ocorre todas as vezes que existir colisões.

De acordo com Incropera; Dewitt; Bergman; Lavigne (2008), o modo de transferência por convecção abrange dois mecanismos. Onde além da transferência em relação ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia pode ser transmitida por meio do movimento global, ou também chamado de macroscópico. Essa movimentação do fluido significa que um determinado número de moléculas está se movendo coletivamente ou como um agregado, esse movimento na presença de um gradiente de temperatura contribui para a transferência de calor. Pois como as moléculas nos agregados mantêm seus movimentos aleatórios, a transmissão de calor esta relacionada a superposição do transporte de energia devido esse movimento. A transferência de calor por convecção ocorre com o contato de um fluido em movimento e uma superfície, os dois estando em temperaturas diferentes. De acordo com Incropera; Dewitt; Bergman; Lavigne (2008 p.4) “uma consequência da interação entre um fluido e a superfície é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual a sua velocidade varia entre zero, no contato com a superfície ($y=0$), e um valor finito u_{∞} , associado ao escoamento do fluido.” Tal região do fluido é conhecida como camada limite hidrodinâmica ou de velocidade. Ainda se as temperaturas da superfície em contato com o fluido, e a temperatura do fluido estiverem diferentes, ocorrerá uma certa região no fluido onde a temperatura pode variar de T_s , em $y=0$, até T_{∞} . Quando associada á região do escoamento que se encontra mais afastada da superfície, região chamada de camada limite térmica, pode ser menor, maior ou ser da mesma dimensão da camada pela qual a velocidade varia.

De acordo com Incropera; Dewitt; Bergman; Lavigne (2008), o modo de transmissão de calor por convecção é sustentado pelo movimento aleatório e global do fluido no interior da camada limite. Onde a contribuição do movimento molecular aleatório (difusão) é predominante na região próximo a superfície, ou seja, onde a velocidade do fluido é menor, na interface compreendida entre a superfície e o fluido ($y=0$), a velocidade do fluido pode ser considerada nula e o calor é transmitido somente através deste mecanismo. Já a contribuição do movimento global do fluido tem origem no fato que a espessura da camada limite aumenta em relação ao progresso do escoamento em relação ao eixo x . Considerando este fato, o calor

que é conduzido ao interior desta camada é arrastado no sentido do escoamento, e depois é transmitido ao fluido que se encontra no exterior da camada limite.

De acordo com Incropera; Dewitt; Bergman; Lavinne (2008 p.5) “A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido.” Refere-se a convecção forçada quando o escoamento do fluido é proveniente de meios externos, podendo ser ventiladores, bombas, ou até mesmo ventos atmosféricos. Já no que diz respeito a convecção livre ou natural, o escoamento do fluido é proveniente de forças de empuxo, que são provocadas a partir de diferenças de densidades (massas específicas) que podem ser causadas quando existe variação de temperatura no fluido. Existem aplicações que utilizam tanto a convecção forçada como a convecção natural.

De acordo com Incropera; Dewitt; Bergman; Lavinne (2008), existem alguns processos de convecção que fazem a troca de calor latente, onde essa troca é geralmente relacionada a uma mudança de fase entre os estados líquido e vapor do fluido.

Ainda de acordo com Incropera; Dewitt; Bergman; Lavinne (2008 p.6) “radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não-nula.” A emissão de radiação não ocorre apenas a partir de superfícies sólidas, pode ocorrer também a partir de gases e líquidos. Qualquer que seja a matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que compõe a matéria. No campo de radiação a energia é transportada por ondas eletromagnéticas, diferente da transferência de calor por condução e convecção que necessitam de um meio material. A transferência de calor por radiação se comporta melhor no vácuo. A radiação também pode incidir em uma superfície por meio de uma vizinhança, pois a radiação pode ser proveniente de uma fonte especial, como o sol, ou outras superfícies às quais a superfície de interesse esteja exposta.

2.4 Escoamento de ar no túnel

De acordo com Potter; Wiggert (2004) três linhas diferentes são utilizadas para entender ou descrever um determinado escoamento, ou seja, linhas de trajetória, linhas de emissão e linhas de corrente. Onde uma linha de trajetória é um conjunto de pontos que são atravessados por uma partícula qualquer, enquanto a mesma se movimenta no campo de escoamento. A linha de trajetória pode oferecer o histórico das localizações dessa partícula. Uma linha de emissão pode ser definida como uma linha instantânea, onde os pontos são ocupados por várias partículas originadas de algum ponto específico, ou seja, as linhas de

emissão mostram a localização das partículas no instante real. Já uma linha de corrente é uma linha de escoamento composta pelo vetor velocidade de cada uma das partículas que ocupa um ponto compreendido na linha de corrente.

De acordo com Potter; Wiggert (2004) os escoamentos de fluidos podem ser classificados em, escoamentos uni, bi ou tridimensionais, escoamentos viscosos e não-viscosos, escoamentos laminares e turbulentos.

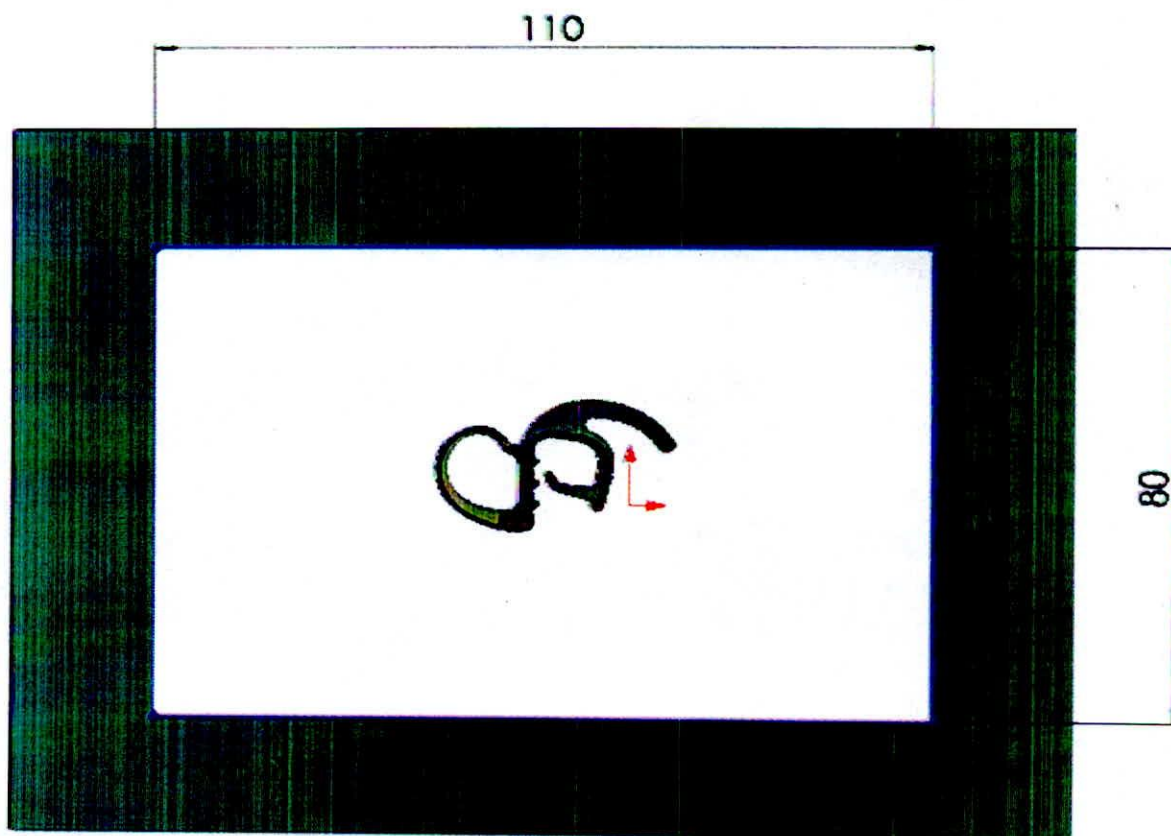
Um escoamento tridimensional muitas vezes pode ser aproximado por um escoamento bidimensional, pode-se citar como exemplo, o escoamento sobre uma represa de grandes dimensões que é tridimensional devido as condições na borda da represa, porém o escoamento na porção central que se encontra afastada das margens pode ser considerada como bidimensional. Na maioria das vezes um escoamento bidimensional, é um escoamento onde o vetor velocidade depende de duas variáveis. Já o escoamento unidimensional depende apenas de uma variável espacial, ocorrendo no escoamento em tubulações longas e retas, ou entre placas paralelas.

Potter; Wiggert (2004), um escoamento não-viscoso é um escoamento onde os efeitos de viscosidade não influenciam e portanto podem ser desprezados, já no escoamento viscoso os efeitos da viscosidade são importantes e devem ser considerados. Para modelar um escoamento não-viscoso pode-se fazer a viscosidade ir até a zero, isso ocasionará em todos os efeitos viscosos igual a zero. Potter; Wiggert (2004 p.83) “É mais difícil criar um escoamento não-viscoso experimentalmente, pois todos os fluidos de interesse (tais como água e ar) têm viscosidade.” Se as tensões de cisalhamento no escoamento forem pequenas também agem em áreas pequenas e não afetam com significância o campo de escoamento.

Potter; Wiggert (2004) um escoamento viscoso pode ser chamado como laminar e turbulento. Onde em um escoamento laminar, o fluido escoar sem a existência de mistura significativa entre partículas vizinhas do fluido. As tensões de cisalhamento viscosas influenciam sempre em um escoamento laminar. Em um escoamento turbulento os movimentos do fluido variam com irregularidades, de modo que as quantidades, de velocidade e pressão, mostram variações aleatórias relacionadas as coordenadas de tempo e espaço. As razões que levam o escoamento a ser laminar ou turbulento estão relacionadas com o que ocorre a uma pequena perturbação do escoamento, ou seja, nos componentes de velocidade. O regime de escoamento esta relacionado a três parâmetros físicos que determinam as condições do escoamento, o primeiro parâmetro é um comprimento de escala do campo de escoamento, o segundo é a velocidade de escala, o terceiro é a viscosidade

cinemática, a união dos três parâmetros pode servir como ferramenta para descrever o tipo de escoamento, essa ferramenta é o número de Reynolds.

Figura 2- Túnel de aquecimento.



Fonte: O autor.

3 MÉTODOS

Será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, devido o estudo realizado em campo.

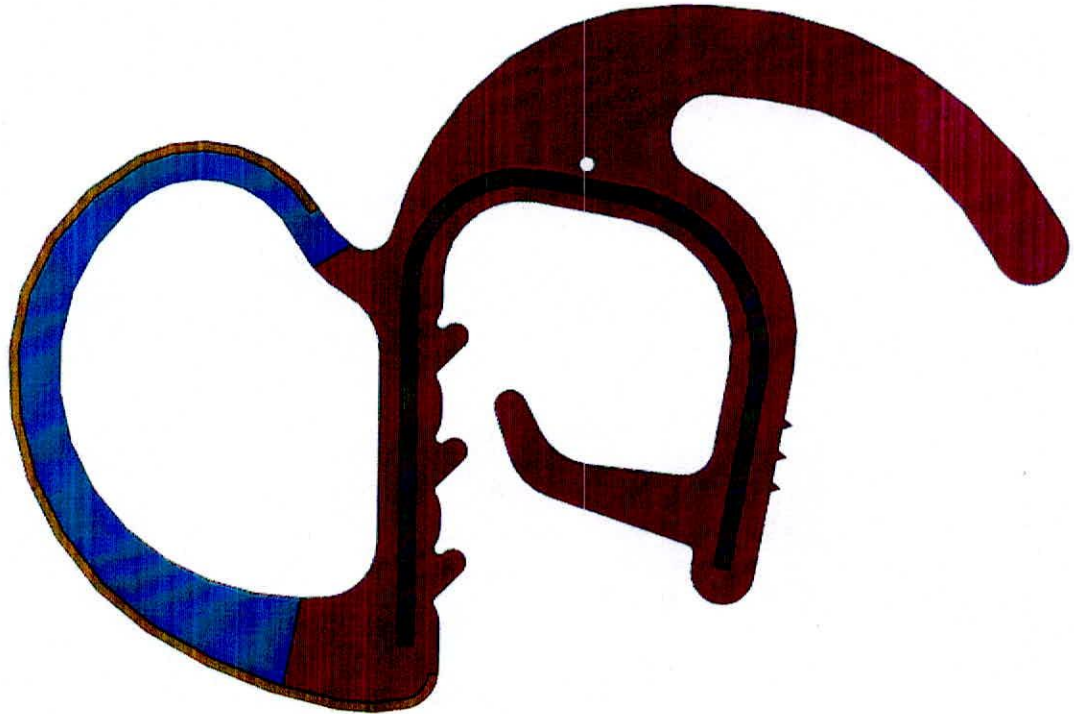
3.1 Densidade dos compostos

Foram coletados os valores de densidade dos três compostos utilizados na extrusão do perfil de EPDM no dia 19/09/2012.





- Composto 1= $0,669 \text{ g/cm}^3$
- Composto 2= $1,24 \text{ g/cm}^3$
- Composto 3= $1,2 \text{ g/cm}^3$

A representação da área que cada composto em relação ao produto final foi realizada com a ajuda do software SolidWorks.

Figura 3- Vista frontal do perfil.



Fonte: O autor.

	Área formada pelo composto 3= 10,28 mm ²
	Área formada pelo composto 1= 38,83 mm ²
	Área formada pelo composto 2= 145,91 mm ²
	Área formada pela fita metálica

3.2 Temperatura das zonas de aquecimento do forno

Foram coletados os dados de temperaturas de todas as zonas de aquecimento, tanto superiores como as zonas inferiores. As temperaturas foram coletadas seguindo como referência os indicadores localizados no painel de controle do forno conforme figura 3, os valores em vermelho significam a situação real e os valores em verde significam o valor

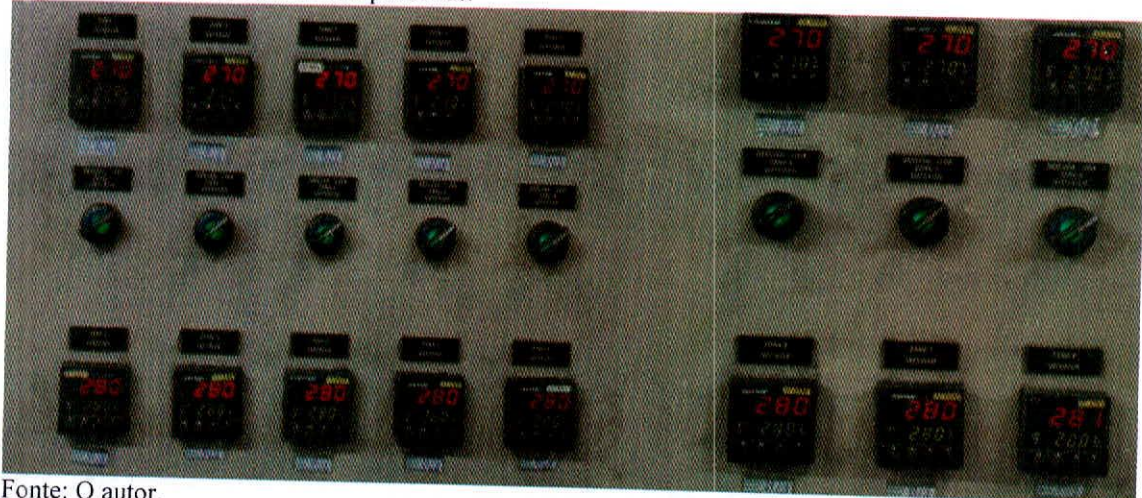
teórico. O forno de ar quente tem um comprimento total de 26.425 mm sendo que entre uma zona de aquecimento e outra existe um pequeno intervalo com comprimento de 235 mm

Figura 4- Forno de ar quente.



Fonte: O autor.

Figura 5- Painel indicador de temperaturas.



Fonte: O autor.

Tabela 1- Situação das zonas de aquecimento durante a leitura de parâmetros.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Superior	270 °C	270 °C	270 °C	270 °C	270 °C	270 °C	270 °C
Inferior	280 °C	280 °C	280 °C	280 °C	280 °C	280 °C	281 °C

Fonte: O autor.

Foram consideradas as temperaturas reais das zonas de aquecimento.

3.3 Velocidade de linha

No dia da coleta dos dados da linha 19/09/2012 a velocidade encontrada foi de 12m/min.

3.4 Temperaturas na superfície do perfil

Foram medidas com um termômetro infra-vermelho, que emite um raio na superfície que se deseja medir em determinado ponto, as temperaturas na superfície do perfil, antes de sua entrada no forno e depois de percorrer todas as zonas de aquecimento.

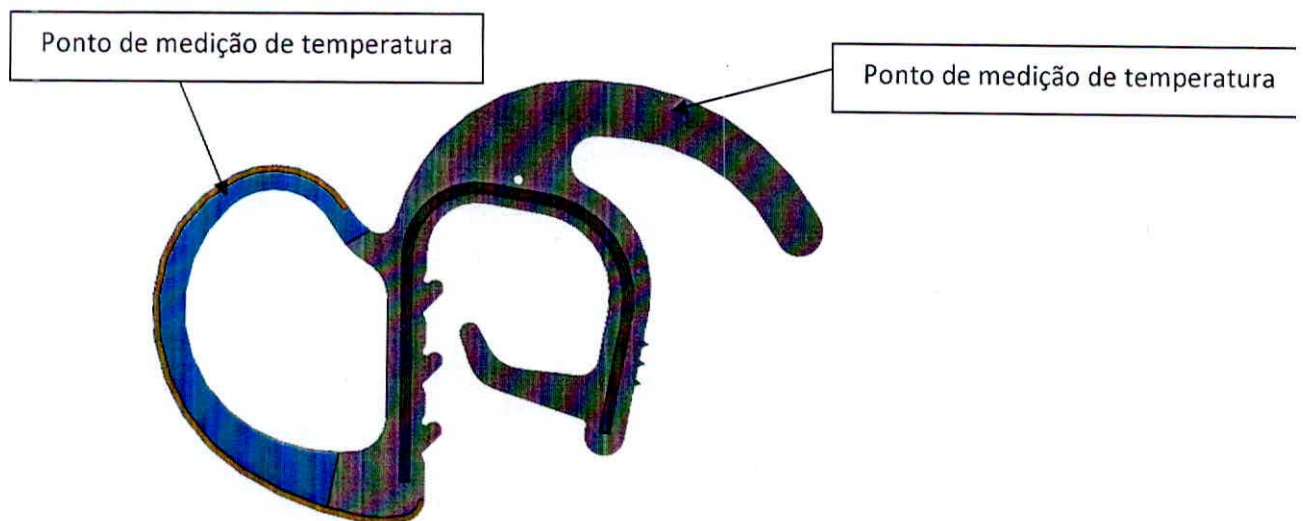
Temperatura de entrada:

- Superfície formada pelo composto 2= 99°C.
- Superfície formada pelo composto 3 sobreposto ao composto 1= 58°C.

Temperatura de saída:

- Superfície formada pelo composto 2= 133°C.
- Superfície formada pelo composto 3 sobreposto ao composto 1= 169°

Figura 6- Pontos onde foram medidas as temperaturas.



Fonte: O autor.

Figura 7: Termômetro infra-vermelho.



Fonte: O autor.

3.5 Teste do grau de vulcanização

Após a passagem do perfil por todos os processos da linha, foi retirada uma amostra de 100 mm e a mesma foi direcionada para o laboratório, onde o técnico realizou um corte transversal na amostra e a colocou em uma chapa de cobre. A amostra seguiu sobre a chapa para uma estufa e foi mantida por 24 horas á temperatura de 100° C. Após as 24 horas o técnico retirou a amostra e analisou o resultado.

3.6 Teste de propriedades mecânicas

Após a passagem do perfil por todos os processos da linha de produção, foram retiradas 3 amostras de 100 mm cada, e as mesmas foram enviadas ao laboratório para análise quanto as propriedades mecânicas do produto final. Foram realizados, teste de compressão, teste de inserção e teste de extração. Cada propriedade tem um valor aceitável que determinado pelas necessidades do cliente, os resultados foram analisados pelo técnico e comparados com as especificações.

4 RESULTADOS

Serão apresentados os resultados encontrados após a análise dos dados coletados em campo.

4.1 Dimensões do túnel de ar quente

Considerando o comprimento total do forno de 26.425 mm e subtraindo os 6 intervalos existentes entre uma zona de aquecimento e outra chegamos aos seguintes valores:

$$L = 26.425 - (6 \times 235) = 25.015 \text{ mm ou } 25,015 \text{ m.}$$

Portanto o valor encontrado é o comprimento útil do túnel de aquecimento, onde se encontra um recipiente fechado.

Considerando a área da seção transversal de 100mmx80mm, temos um valor de 8000mm^2 ou $8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

O volume do túnel de aquecimento pode ser expresso utilizando o comprimento útil e a área da seção transversal.

$$V = 25.015 \times 8000 = 2,0012 \times 10^8 \text{ mm}^3 \text{ ou } 0,20012 \text{ m}^3$$

4.2 Tempo de residência do perfil no forno

Durante a leitura de parâmetros a velocidade encontrada foi de 12m/min, então considerando essa velocidade pode-se determinar o tempo que o perfil permaneceu no túnel de aquecimento.

$$T = 25,015 \text{ m} / 12 \text{ m/min} = 2,08 \text{ min ou } 125,075 \text{ seg.}$$

4.3 Teste de vulcanização

Figura 8- Resultado do teste de vulcanização.

DATA: 19/09/2012

DATA EXTRUSÃO: 19/09/2012

Nº FORMULÁRIO: 4244

TESTE SOLICITADO:
Teste de Vulcanização

INFORMAÇÕES TÉCNICAS

VALOR ESPECIFICADO:

MOTIVO DO TESTE:

RESULTADO EM: FORMULÁRIO RTI MESMO FORMULÁRIO

RESULTADO DO TESTE:
GABU-3

LABORATÓRIO

Analista Resp.: _____

Data: 20/09/12

Ass.: _____

Aprovado Reprovado

Aprovado Condicional

OBSERVAÇÕES:

LAUDO FINAL

APROVADO: REPROVADO:

Analista: _____

DATA INÍCIO: ____/____/____ HORA INÍCIO: _____ TEMPO PREVISTO: _____

DATA TÉRMINO: ____/____/____ HORA TÉRMINO: _____ TEMPO GASTO: _____

PRAZO PREVISTO DE ENTREGA: ____/____/____ NOME/VISTO RECEPTOR: _____ DATA: 20/09/12

Fonte: O autor.

O resultado do teste de vulcanização não foi satisfatório, não atingiu o grau adequado para seguir como produto final.

4.4 Propriedades mecânicas

Figura 9- Resultados dos testes para propriedades mecânicas.

Teste de Compressão 2	N/MM	19/9/2012	11:15	3	7	4	Aprovado
Teste de Compressão 2	N/MM	19/9/2012	12:15	3	7	3,7	Aprovado
Teste de Compressão 2	N/MM	19/9/2012	13:15	3	7	3,2	Aprovado
Teste de Compressão 2	N/MM	19/9/2012	14:15	3	7	3	Aprovado
Teste de Inserção 1	N/MM	19/9/2012	10:15		30	12,2	Aprovado
Teste de Inserção 1	N/MM	19/9/2012	11:15		30	11,7	Aprovado
Teste de Inserção 1	N/MM	19/9/2012	12:15		30	13,7	Aprovado
Teste de Inserção 1	N/MM	19/9/2012	13:15		30	10,7	Aprovado
Teste de Inserção 1	N/MM	19/9/2012	14:15		30	11,8	Aprovado
Teste de Extração	N/MM	19/9/2012	10:15	59		79,3	Aprovado
Teste de Extração	N/MM	19/9/2012	10:15	59		75	Aprovado
Teste de Extração	N/MM	19/9/2012	12:15	59		81,9	Aprovado
Teste de Extração	N/MM	19/9/2012	13:15	59		73,3	Aprovado
Teste de Extração	N/MM	19/9/2012	14:15	59		80	Aprovado

Fonte: O autor.

Os resultados para os testes de propriedades mecânicas foram satisfatórios.

5 CONCLUSÃO

A utilização de materiais poliméricos pela humanidade pode ser considerada uma revolução, pois seu uso substituiu muitas vezes os materiais convencionais como o aço por exemplo. Os materiais poliméricos são sintéticos, o que possibilita aplicações variadas sem deixar de ter resistência e eficiência. Como exemplo desses materiais está a borracha sintética EPDM (etileno-propileno-dieno).

A vulcanização de EPDM em túnel de ar quente utiliza como método de transmissão de calor a convecção, onde o ar quente que circula no túnel é o meio de transferência de calor para o perfil que passa a uma determinada velocidade pelo túnel. O ar por sua vez é considerado um fluido e os fluidos podem escoar em vários regimes dependendo da aplicação.

Após a retirada das amostras para que fossem realizados os devidos testes, e analisando os resultados obtidos pode-se concluir que o perfil de borracha EPDM com as respectivas densidades de cada composto utilizado, com as temperaturas utilizadas nas zonas de aquecimento no dia 19/09/2012, foram satisfatórios para os testes de propriedades mecânicas, porém o teste de vulcanização não foi aprovado, ou seja, com esses parâmetros de temperatura para o perfil em questão não é possível atingir o grau de vulcanização adequado.

REFERÊNCIAS

CANAUD, Cristiane; VISCONTE, Leila L. Y.; NUNES, Regina C. R. **Propriedades mecânicas e de inflamabilidade de composições de borracha EPDM carregadas com negro de fumo e hidróxido de alumínio.** Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v11n1/v11n1a07.pdf>>. Acesso em 22 de setembro de 2012.

HAGE JR, Elias. **Aspectos Históricos sobre o Desenvolvimento da Ciência e da tecnologia de Polímeros.** Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14281998000200003&script=sci_arttext>. Acesso em: 27 de abril de 2012.

INCROPERA, F. P. ; DEWITT, David P. ; BERGMAN, Theodore L. ; LAVINE, Adriene S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2008.

OLIVEIRA, Marcia G.; SOARES, Bluma G. **Influência do sistema de vulcanização nas propriedades da mistura NBR/EPDM.** Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282002000100007&lang=pt>. Acesso em: 27 de abril de 2012.

POTTER, Merle C.; WIGGERT, David C. **Mecânica dos fluidos.** 3 ed. São Paulo; Cengage Learning, 2004.

PINHEIRO, Eduardo G. **Modelos numéricos aplicados a vulcanização de pneus.** Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-25082003-090611/pt-br.php>>. Acesso em 22 de setembro de 2012.

KREITH, F.: **Princípios da transmissão de calor.** São Paulo; Edgard Blucher, 1977.